

На правах рукописи



МИШЕНИНА София Павловна

**СТРОЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПУТЕЙ
РАЗГРУЗКИ ГИДРОТЕРМ НА ПРИМЕРЕ
ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ
ОСТРОВНОЙ ГРЯДЫ ПО ДАННЫМ ГЕОЭЛЕКТРИКИ
И ГЕОХИМИИ**

Специальность 1.6.9 – «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Ельцов Игорь Николаевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории эколого-экономического моделирования техногенных систем ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

Официальные оппоненты: **Гохберг Михаил Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий IV отделением Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва.

Веселов Олег Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности ФГБУН Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Петропавловск-Камчатский

Защита состоится «26» января 2026 года на заседании диссертационного совета 24.1.062.02 при ФГБУН Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте: https://crust.ru/newsfull_255.html.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.062.02,
К.Г.-М.Н.

 Данилов Б.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объекты исследования – кальдеры вулкана Узон, Академии Наук, вулканы Мутновский и Эбеко принадлежат единой вулканической области, которая находится на значительном протяжении восточного побережья Камчатки в пределах Курило-Камчатской островной дуги, где происходит субдукция Тихоокеанской плиты под Евразийскую (рис. 1).



Рисунок 1 – Слева - объекты исследования на космоснимке сервиса Google Earth от 01.2021 г. в приближении с высоты 1 км. На фотографиях – термальные источники и общий вид объектов исследования соответственно номерам с космоснимка

Эти объекты демонстрируют различные формы посткальдерного вулканизма и гидротермальной активности, отражая влияние магматических процессов на формирование уникальных геологических и геотермальных ландшафтов. Узон, Мутновский и Академии Наук входят в список ЮНЕСКО как часть природного наследия «Вулканы Камчатки». Эбеко же и Мутновский объединяет наличие удивительных по составам источников – контрастные в пределах одного термального поля, ультракислые и высокоминерализованные растворы.

Актуальность исследования

Актуальность диссертационного исследования определена необходимостью внедрения метода электротомографии в комбинации с геохимическим опробованием для описания строения термальных полей, а также при исследовании геотермальных месторождений. Дополнительной актуальной задачей является изучение подповерхностного пространства термальных полей, выявление закономерностей в структурах подводящих каналов для обеспечения безопасности туристических маршрутов.

Основную роль в изучении активных гидротермальных систем играют экспедиционные исследования. Однако недоступность объектов, суровые

условия работы, необходимость нести оборудование на себе существенно ограничивают количество видов исследования. Между тем во многих странах, включая Россию, на протяжении многих лет функционируют геотермальные электростанции – источники возобновляемой энергии, количество которых постоянно растёт. Для поддержания эффективности и расширения такого рода электростанций необходимы более детальные данные по строению и активности гидротермальных систем. Таким образом, **актуальность** работы заключается в необходимости актуализации имеющихся и получения новых данных по термальным полям активных вулканов Камчатки.

Целью исследования является выявление путей, структуры и физико-химических параметров разгрузки приповерхностных гидротерм на примере термальных полей Курило-Камчатской островной гряды.

Научные задачи:

- Определить геоэлектрическую зональность подповерхностного пространства термальных полей с помощью методов геоэлектрики: индукционным частотным зондированием (ЧЗ) и электротомографией (ЭТ);
- Установить качественную и количественную связь геофизических и геохимических параметров среды;
- Провести интерпретацию результаты геофизических и геохимических исследований для определения строения подповерхностного пространства гидротермальных систем.

Научная новизна

Впервые для установления строения каналов разгрузки на нескольких гидротермальных полях Курило-Камчатской островной гряды применён комплекс электрометрических методов (частотное зондирование, электротомография), в сочетании с геохимическим опробованием.

Построены геоэлектрические модели, описывающие конфигурации и структуры каналов гидротерм, определены их количественные характеристики (геометрические параметры, удельное электрическое сопротивление, минерализация и др.).

Для исследованных объектов установлено, что гидротермы различного типа и гидрохимического состава питаются из единого канала, а вариации их состава, вероятно, обусловлены взаимодействием системы «вода-порода», что подтверждается геохимическим опробованием.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированного научно-методического аппарата. А именно:

- приборная база – современные сертифицированные приборы IRIS Syscal PRO Switch 48, Скала-48, Скала-48K12, ЭМС (Nemfis) для электроразведочных исследований; Эксперт-001 для определения pH, Eh, основных катионов и анионов in situ, HACH Fe2⁺ с соответствующим набором реагентов для определения двухвалентного железа in situ, IRIS

Advantage (Аналитическая ошибка - 10-15%) в АЦ ИГМ СО РАН для метода ICP-AES;

- ПО для первичной фильтрации данных электротомографии SibER Tools, Xeris, ProsysII; ПО для решения обратных задач Res2DInv, Res3DInv (отклонение каждой последующей итерации при инверсии минимально, но не более 10%, в работе приведены результаты пятой итерации каждой инверсии).

Теоретическая и практическая значимость

Полученные и описанные в данной работе результаты комплексных геофизико-геохимических исследований позволили определить общие питающие каналы у четырёх термальных полей. Это отличается от многочисленных, в том числе и современных, исследований, где рассматриваются индивидуальные питающие каналы для каждого термопроявления в связи с различиями в их составе, уровне кислотности, окислительно-восстановительном потенциале и степени минерализации.

Практическая значимость данной работы заключается в эффективности изучения геотермальной деятельности с помощью апробированного комплекса геофизико-геохимических исследований. Результаты исследования данных систем могут использоваться для выбора точек бурения геотермальных скважин. Кроме того, результаты диссертации обосновывают неразрушающие способы контроля подповерхностного пространства, позволяющие обеспечить безопасность маршрутов туристических троп.

Методы исследований включают в себя полевые изыскания с опробованием термальных источников и лабораторные измерения. Частотное зондирование (ЧЗ) выполнялось аппаратурой ЭМС (ООО «КБ Электрометрии»), частотный диапазон которого находится в пределах от 2,5 до 250 кГц (14 частот), шаг измерений ~ 1 метр. Электротомография (ЭТ) проводилась с многоэлектродной электроразведочной аппаратурой Iris Syscal Pro Switch 48 (IRIS Instruments, France) и Скала-48 (ООО «КБ Электрометрии») косами с шагом 5 м, установкой Шлюмберже. Выполнялись замеры in situ неустойчивых параметров растворов (рН, Eh, Т, электропроводность - Hanna (рН, Eh-метр), иономер Эксперт-001). Лабораторные анализы – ICP-MS выполнял Аналитический центр ИГМ СО РАН. В соответствующих разделах третьей главы приведены подробное описание методов и приборов с их характеристиками.

Защищаемые научные результаты

1. Грязевые котлы на термальных площадках кальдеры вулкана Узон разгружаются через серию трубообразных выходов, что установлено с помощью частотного зондирования. Построена геоэлектрическая модель, описывающая зональность внутренних частей термального поля, которая определяется, главным образом, соотношением жидкой и твёрдой фазы. Минерализация и уровень концентрации элементов в

жидкой фазе зависит от доли флюида, взаимодействующего с вмещающими породами, что и определяет электропроводность системы «вода-порода».

- По результатам интерпретации данных электротомографии установлено, что гейзеры Академии Наук (гидротермы системы озера Карымского) питаются из единой обводнённой линзы, расположенной на глубине от 5 до 20 метров; питающие каналы гидротерм Медвежьих и горячих выходов на полуострове Новогодний уходят корнями к общему источнику, тяготеющему к кратеру Токарева.
- По данным частотного электромагнитного зондирования и электротомографии термальные растворы грязевых котлов на Донном фумарольном поле вулкана Мутновский с уникальным химическим составом имеют один питающий канал, прослеженный до глубины более 40 м. Разнообразие составов термальных разгрузок определяется вариациями соотношения флюид/метеорные воды и степенью взаимодействия растворов с вмещающими породами. Согласно построенной геоэлектрической модели, выходы ультракислых высокоминерализованных растворов грязевых котлов имеют чётко прослеживаемые стабильные структуры.

Личный вклад автора заключается в участии во всех полевых работах в составе экспедиционных отрядов. Автором были построены и проанализированы все геоэлектрические разрезы, использованные в работе. Автор проводил гидрохимическое опробование термальных вод, замеры физико-химических параметров и содержания анионов в пробах, обработку и обобщение результатов. Подготовлены публикации по теме диссертации.

Фактический материал, собранный лично автором или при непосредственном его участии, представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Фактический материал, собранный лично автором и при его непосредственном участии

Исследования: Объекты:	Вулкан Мутновский	Кальдера Академии Наук	Кальдера вулкана Узон	Вулкан Эбеко
Профили ЭТ	4	21	2	6
Профили ЧЗ	16	6	14	10
Пробы жидкости, вещества котлов	486	440	98	28
Анализы ИСП- АЭС	421	386	83	26
Площадки, покрытые сетью исследований для трёхмерной визуализации:				
ЧЗ	1	-	1	1
ЭТ	2	1	-	-

Он включает количество профилей ЭТ и ЧЗ, объединенных в трёхмерный массив данных, либо же обработанных и рассмотренных по отдельности, количество отобранных и проанализированных проб жидкости и твёрдого вещества со стенок котлов). Приведено количество анализов проб растворов и поровых вод методом ИСП-АЭС, выполненных в Аналитическом центре ИГМ СО РАН на приборе IRIS Advantage. Все представленные материалы проанализированы и проинтерпретированы автором.

Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались на IX, X и XVI международных научных конференциях «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2013 г., 2014 г., 2020 г.); на 6-й интернациональной коференции и выставке «Геонауки – инвестиции в будущее» (Санкт-Петербург, 2014); на научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе» (г. Южно-Сахалинск, 2011 г.); на IX Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (г. Новосибирск, 2018 г.); на всероссийской конференции с участием зарубежных ученых «Современные направления развития геохимии» (Иркутск, 2022 г.); на 19-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная и рудная геофизика 2023» (Санкт-Петербург, 2023 г.). Материалы диссертации изложены в 6 статьях в российских и зарубежных журналах из списка ВАК категории К1 («Геосистемы переходных зон», «Тихоокеанская геология», «Reliability: Theory and Applications», «Geofluids») и 18 публикациях в сборниках материалов научных конференций.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объем работы составляет 127 страниц, включая 51 рисунок и 11 таблиц.

Благодарности

Благодарю моего научного руководителя И.Н. Ельцова за совместные экспедиционные исследования и стимул к написанию диссертации.

Благодарю коллег, научивших меня многому, с кем мы работали на вулканах в разные годы в составе отрядов: Ю.А. и А.К. Манштейнов, Г.Л. Панина, А.А. Шевко, Ю.Г. Карина, М.П. Гору, О.Р. Хубаеву, Е.Г. Лупикину, Г.М. Гавриленко, семью Котенко, А.Н. и М.А. Фоминых, Д.Ю. Кузьмина, Е.Г. Калачёву, О.Л. Гаськову, А.Н. Фаге, Д.И. Фадеева. Благодарю моих учителей М.И. Эпова и В.Н. Глинских за профессиональное становление и интерес к науке. Выражаю благодарность Е.В. Балкову за ценные советы и внимание к моей работе.

Я очень благодарна моей маме профессору Бортниковой С.Б. – за профессию и любовь к ней, за все мои экспедиции. Благодарю мою семью: папу П.Б. Бортникова, сестру Е.П. Шевко, дочь Еву, и отдельно - моего мужа М.В. Мишенина за поддержку на всех этапах исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность исследования, поставлена цель и описаны научные задачи, сформулированы защищаемые научные результаты, их новизна, личный вклад соискателя, теоретическая и практическая значимость работы.

В Главе 1 представлен аналитический обзор современных исследований термальных полей активных вулканов. Приведены основные особенности состава термальных полей на территории России и за рубежом. Описана история изучения вулканов с помощью геофизических методов и их связи с геологией, геохимией, приведены основные публикации по теме исследования.

В Главе 2 приводится краткое физико-географическое описание объектов исследования. Рассмотрена история извержений вулканов, их основные геологические особенности. Приведены описания термальных полей, виды термальной деятельности.

В Главе 3 описаны методы исследования. На изучаемых вулканах проводился спектр комплексных работ: электротомография, частотное электромагнитное индукционное зондирование, геохимическое опробование с последующими лабораторными анализами (подробное описание методов и приборов приведено в тексте диссертации). Также в работе приведены расчёты по формуле Муанфара [Moinfar et al., 2010] для оценки количественной связи между геофизическими и геохимическими параметрами среды термальных полей:

$$\sigma_w = \left[\left(0.0123 + \frac{3647.5}{C_w^{0.955}} \right) \times \frac{81.77}{T+6.77} \right]^{-1}, \text{ где}$$

C_w – концентрация соли NaCl в ppm;

T – температура в градусах по Фаренгейту;

σ_w – электропроводность пластовой воды, См/м

Приведённые методы исследования и соответствующие им приборы не раз применялись на термальных полях активных вулканов. Однако, уникальным является именно комплекс работ, реализованный с помощью приборов и методов. Для каждого из объектов, согласно рекогносцировке, выбран набор, который дал действительно новые результаты.

Глава 4. Анализ результатов исследований

4.1 Кальдера вулкана Узон

Схема работ на термальном поле кальдеры Узон приведена на рисунке 2. Выполнено 2 профиля ЭТ длиной 48 метров с межэлектродным расстоянием 1 метр и над ними - 14 параллельных профилей ЧЗ той же длины с расстоянием между профилями 1 метр. При этом, площадка ЧЗ проходит непосредственно по профилям ЭТ. Этот объект интересен обилием термальных источников, находящихся на небольшой площадке.

Геохимические параметры термальных и поровых растворов

Растворы котлов кислые, значения рН колеблются от 2.2 до 4.3, Ен варьирует от слабо- до сильноокислительных условий. Воды сульфатного и сульфатно-хлоридного типа. Состав растворов более стабильный, чем на термальных полях влк. Мутновский и источниках Академии Наук. Сопоставляя уровень минерализация с УЭС растворов по данным ЧЗ, становится очевидна обратно пропорциональная зависимость: при росте минерализации электрическое сопротивление среды снижается (рис. 3).

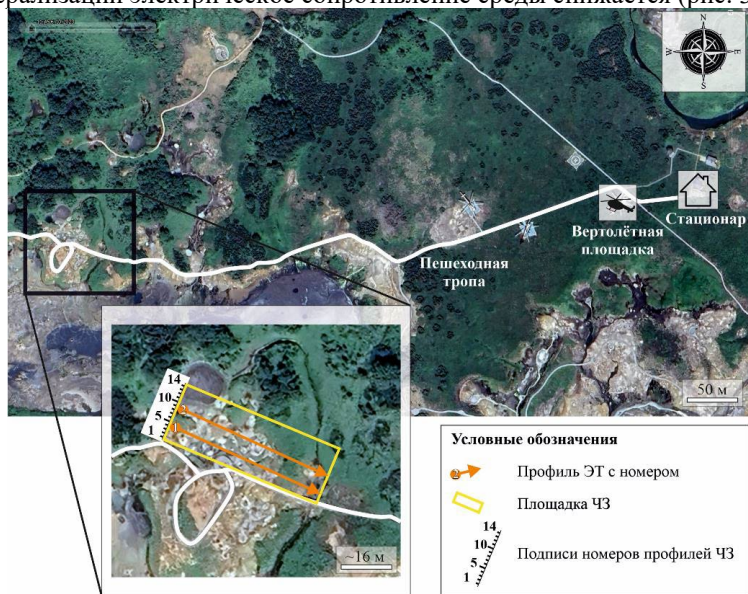


Рисунок 2 - Расположение профилей ЭТ (выделены оранжевым) и площадки исследований методом ЧЗ (жёлтым) на термальном поле кальдеры влк. Узон на космоснимке в приближении с высоты 600 м



Рисунок 3А (слева) -Кислотно-щелочные условия в сопоставлении с уровнем минерализации источников термальной площадки кальдеры вулкана Узон. Рисунок 3Б (справа) - Минерализация в сопоставлении с

УЭС термальных источников кальдеры вулкана Узон по данным частотного зондирования

Результаты геофизических исследований

Результаты зондирований разными методами вполне сопоставимы и дополняют друг друга (рис. 4). Все разрезы приведены к единой шкале, являются высокопроводящими ($УЭС \leq 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). На профиле ЭТ № 1 идентифицируются низкоомные зоны ($УЭС \leq 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), прослеживающиеся до поверхности, и далее соединяются друг с другом на глубине 2 м. Зоны имеют общее основание (0.1-4 $\text{Ом}\cdot\text{м}$). На соответствующем профиле ЧЗ № 2 сопротивление едва достигает 30 $\text{Ом}\cdot\text{м}$. Начинаются профили с площадки повышенного сопротивления – в том месте находятся небольшие парящие грязевые вулканы. Скорее всего, повышение сопротивления связано с низкой обводнённостью вулканов, насыщением поверхности газом. Далее находится котёл №7, нашедший отображение на профиле ЭТ, и визуально не наблюдаемый на профиле ЧЗ. Это может быть связано с разной разрешающей способностью методов.

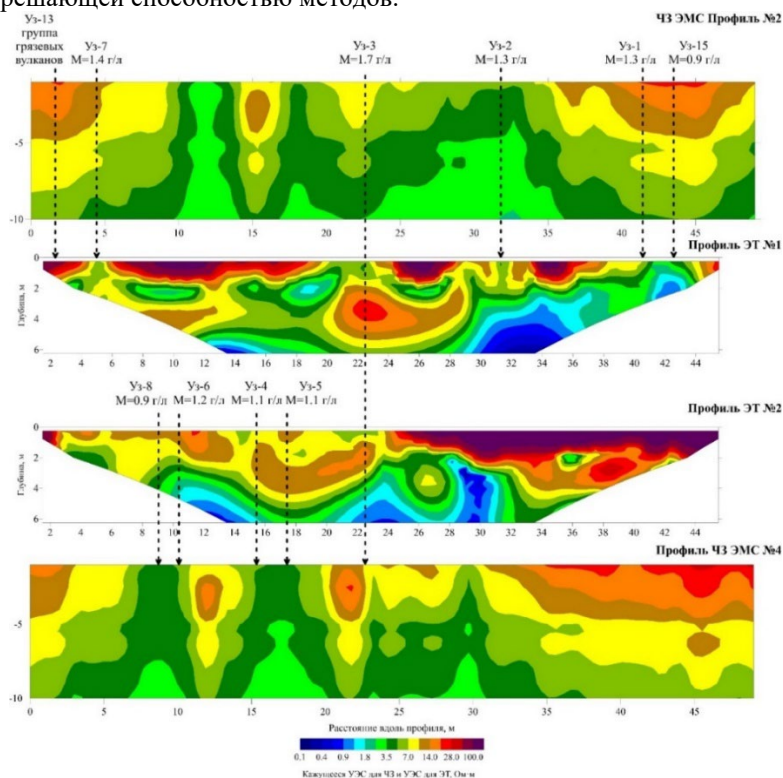


Рисунок 4 - Профили ЭТ и ЧЗ на термальном поле кальдеры вулкана Узон

На профиле ЭТ № 2 с середины и до конца профиля на поверхности проявлена относительно высокоомная зона (до 100 $\text{Ом}\cdot\text{м}$), она же повторяется на профиле ЧЗ – это связано с окончанием термальной

площадки, далее за профилями течёт небольшой ручей. На втором профиле ЭТ подводящие каналы источников менее заметны, зато на профиле ЧЗ выделены достаточно. На рисунке 5 представлена изоома, отвечающая кажущемуся сопротивлению $4.9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

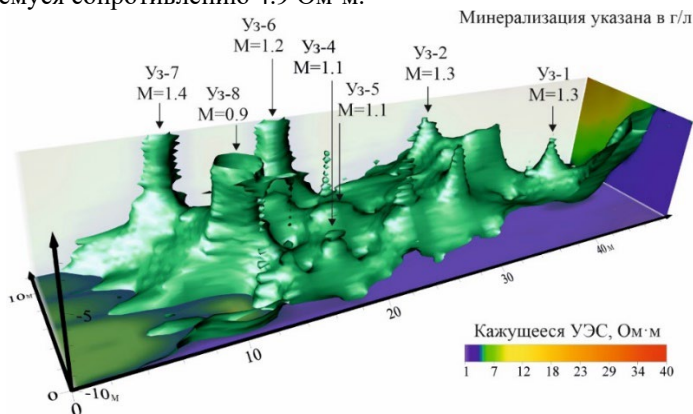


Рисунок 5 - Трёхмерная визуализация результатов исследований методом

ЧЗ над грязевыми котлами термальной площадки кальдеры влк. Узон Связь геофизических и геохимических параметров среды

Для растворов грязевых котлов термального поля кальдеры вулкана Узон были выполнены расчёты эмпирической зависимости, позволяющей связать гидрохимические параметры среды с геофизическими натурными измерениями. Расхождение значений колеблется в пределах допустимого, поскольку гидротермально изменённые породы и проводящие высокоминерализованные растворы на разрезах ЧЗ и ЭТ незаметно переходят из одного в другое, а пробы вещества берутся точно вдоль профилей зондирования и отражают геохимические параметры растворов самих термальных источников. Поэтому значения оценочных и измеренных УЭС необходимо рассматривать в определённых диапазонах, соответствующих высокопроводящим зонам на профилях (от 0.1 до $25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). В таком случае оценочные и измеренные значения сопоставимы.

Первое защищаемое положение. Грязевые котлы на термальных площадках кальдеры вулкана Узон разгружаются через серию трубообразных выходов, что установлено с помощью частотного зондирования. Построена геоэлектрическая модель, описывающая зональность внутренних частей термального поля, которая определяется, главным образом, соотношением жидкой и твёрдой фазы. Минерализация и уровень концентрации элементов в жидкой фазе зависит от доли флюида, взаимодействующего с вмещающими породами, что и определяет электропроводность системы «вода-порода».

4.2 Кальдера Академии Наук

С помощью аппаратуры IRIS Syscal Pro были выполнены исследования на Карымском озере в кальдере Академии Наук. На противоположном берегу озера Карымского были выполнены следующие работы (рис. 6):

- 18 профилей ЭТ непосредственно на акватории озера Карымского, над кратером Токарева;
- профиль ЭТ вдоль ручья Горячего;
- несколько профилей ЧЗ вкрест профиля ЭТ и ручья Горячего.

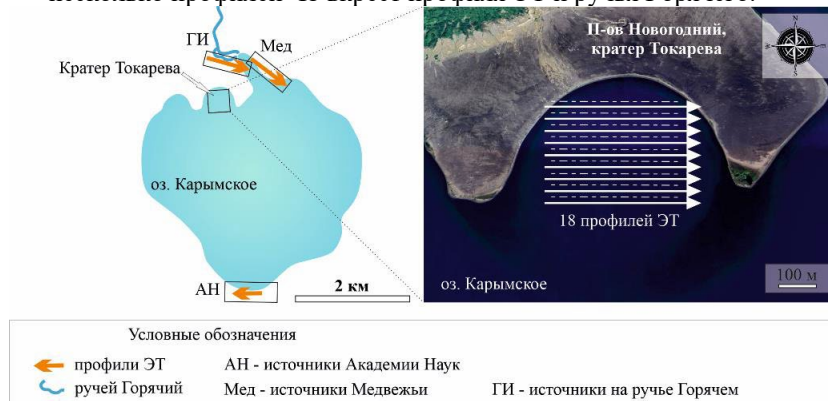


Рисунок 6 - Карта-схема участка работ в кальдере Академии наук, справа - схема расположения профилей над кратером Токарева

Геохимические параметры термальных и поровых растворов

Физико-химические особенности растворов источников кальдеры Академии Наук варьируют в широком диапазоне, как рН, так и Eh (рис. 7).

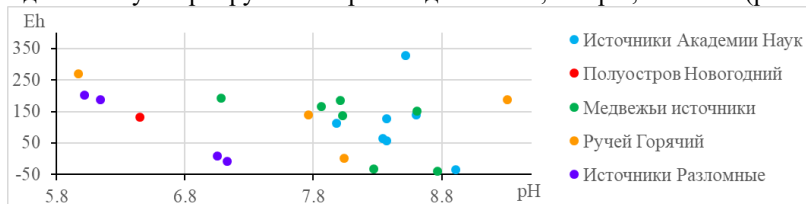


Рисунок 7 - Кислотно-щелочные условия в сопоставлении с окислительно-восстановительным потенциалом источников Академии Наук, Медвежьих, полуострова Новогодного и ручья Горячего

Наиболее восстановительные условия и щелочной тип вод установлен в Пийповских источниках и в источниках Академии Наук. Причем если колебания окислительно-восстановительных условий довольно широки, то рН растворов изменяется незначительно. Для Береговых и Медвежьих источников установлено значительное изменение и рН и Eh условий: от восстановительных щелочных до окислительных слабокислых. Стоит учитывать, если значения рН в растворах источников стабильны и

колеблются в пределах от 8.0 до 9.5, то Eh изменяется в широких пределах: от 37 до 326 mV. Для озера же характерна окислительная обстановка при значительных изменениях pH.

Результаты геофизических исследований

Источники Академии Наук

Поскольку условия на склоне кальдеры ограничивают раскладку кос для выполнения ЭТ, то был выполнен профиль длиной 120 метров, с шагом между электродами 5 метров, зондирования производились расстановкой Шлюмберже. Профиль ориентирован с востока на запад, и пересекает большую часть источников (рис. 8).

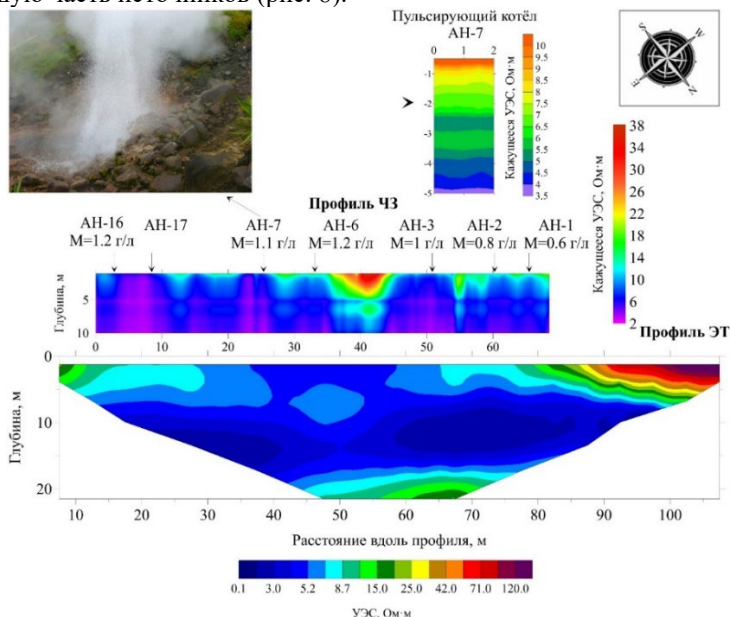


Рисунок 8 - Комплекс геофизических исследований на источниках Академии Наук. Сверху – вниз: точечное ЧЗ над пульсирующим котлом (АН-7), профиль ЧЗ и профиль ЭТ на термальной площадке

Над профилем ЭТ расположен согласованный по раскладке профиль ЧЗ, более детально отображающий верхнюю часть разреза. В данном случае при высокопроводящей среде УЭС и кажущееся УЭС на двух профилях зондирования практически идентичны. На профиле ЧЗ стрелками отмечены термальные источники (АН-1, АН-2 и т.д.). Очевидно, что они находятся непосредственно на вертикальных аномалиях пониженного сопротивления – таким образом ЧЗ позволяет увидеть приповерхностные каналы термальных котлов, верхнюю часть выхода на поверхность флюида.

Для большого пульсирующего котла (АН-7) представлен отдельный небольшой профиль ЧЗ длиной 2 метра непосредственно над котлом.

Очевидно, что в данном случае канал не оконтуривается, однако, мы можем наблюдать повышение кажущегося УЭС от глубины к поверхности. Это объясняется тем, что высокоминерализованные воды, находящиеся на поверхности, не могут сравниться по проводимости с гидротермально изменёнными породами, слагающими стенки котла и его основание.

Кратер Токарева

Трёхмерная визуализация инверсии массива данных из объединённых 18 профилей ЭТ приведена на рисунке 9: последовательно представлены три изоповерхности, каждая из которых соответствует определённому слою. Изоповерхность 55 Ом·м (отмеченная на рисунке 9 А) представляет собой поверхность рыхлых отложений на дне кратера, окончание водной толщи, что подтверждено отбором проб со дна озера. Изоповерхность 80 Ом·м на рисунке 9 Б соответствует рыхлым вулканогенным отложениям, накопившимся с момента образования кратера. Изоповерхность 98 Ом·м (отмеченная на рисунке 9 В) соответствует поверхности коренных пород постройки вулкана. В результате построения геоэлектрической модели кратера Токарева на поверхности 80 Ом·м на фоне рыхлых отложений выявлен канал, направленный вертикально вниз, который интерпретирован как флюидопроводник, являющийся поставщиком термальных растворов и газов ко дну озера из нижних горизонтов.

Связь геофизических и геохимических параметров среды

Оценочные значения УЭС для растворов термальных источников кальдеры Академии Наук приближаются к измеренным, аналогично результатам по кальдере влк. Узон и влк. Мутновский (табл. 2). Большую роль здесь играет низкий уровень минерализации растворов: чем выше уровень минерализации, тем ниже удельное электрическое сопротивление. Однако при такого рода оценке мы получаем не столь высокие значения, как по результатам исследований методом ЭТ и ЧЗ. Очевидно, это связано с общей проводимостью среды, не напитанной высокоминерализованными растворами, как, например, в кальдере влк. Узон.

Таблица 2 - Измеренные и оценочные параметры для некоторых термальных котлов кальдеры Академии Наук

Изм. и оценочные параметры	Источники Академии Наук						
	АН-1	АН-2	АН-3	АН-6	АН-7	АН-15	АН-16
рН	7.98	8.34	8.37	8.37	8.91	8.6	8.52
Еh	112	64	128	56	-36	140	327
М, г/л	0.6	0.8	1.0	1.2	1.1	1.2	1.2
Т, °С	80	80	80	80	80	80	80
ρ_{мп}, Ом·м	3.8	2.9	2.2	1.9	2.0	1.8	1.9
ρ_{эт}, Ом·м	9	7	5	4	4	8	9
ρ_{чз}, Ом·м	8	8	10	11	4	5	6

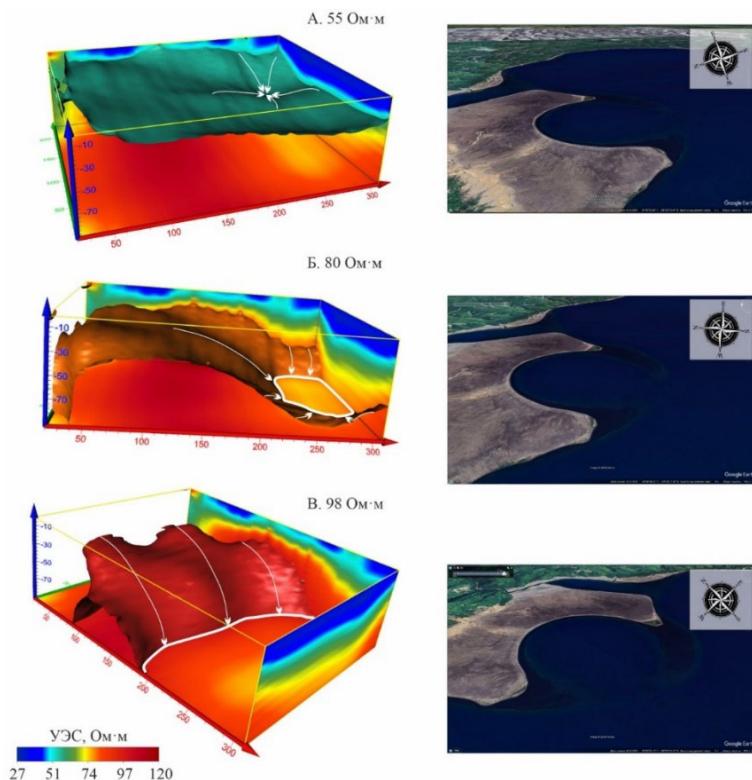


Рисунок 9 - Слева: визуализация результатов трёхмерной ЭТ на кратере Токарева: три изоповерхности, соответствующие 55, 80 и 98 Ом·м. Белыми стрелками отмечены ниспадающие борта кратера, белой линией – его очертания по данным ЭТ. Справа – соответствующие по направлению виды на полуостров Новогодный, спутниковые снимки в приближении с высоты 480 метров

Второе защищаемое положение. По результатам интерпретации данных электротомографии установлено, что гейзеры Академии Наук (гидротермы системы озера Карымского) питаются из единой обводнённой линзы, расположенной на глубине от 5 до 20 метров; питающие каналы гидротерм Медвежьих и горячих выходов на полуострове Новогодный уходят корнями к общему источнику, тяготеющему к кратеру Токарева.

4.3 Вулканы Мутновский и Эбеко

Вулканы Эбеко и Мутновский объединены в единую главу в связи со схожестью составов растворов: оба вулкана обладают аномальными ультракислыми высокоминерализованными растворами. В течение нескольких полевых сезонов на Донном термальном поле влк. Мутновский

был выполнен ряд геофизических работ: двух- и трёхмерные исследования методами ЭТ и ЧЗ (рис. 10):

- 2009 год: 1 профиль ЭТ, 16 профилей ЧЗ;
- 2013 год: 1 профиль ЭТ, расположенный квадратом – для получения пирамиды данных;
- 2020 год: 3 профиля ЭТ.

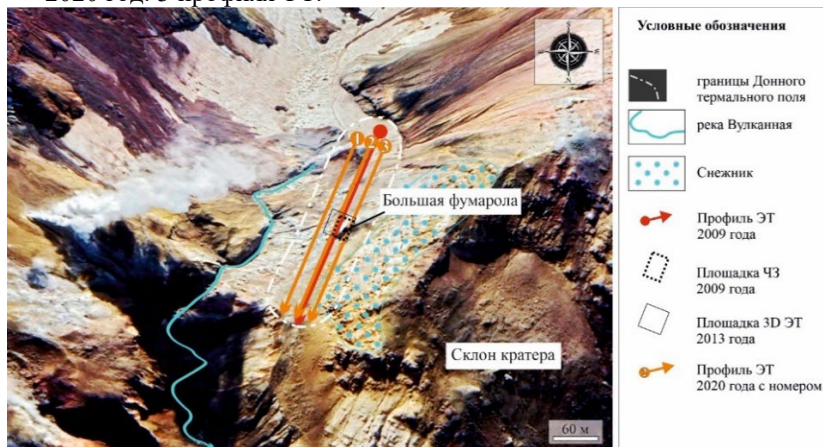


Рисунок 10 - Схема исследований на Донном термальном поле
влк. Мутновский

В июле 2021 года на юго-западном термальном поле вулкана Эбеко был заложен профиль микрофотографии. Межэлектродное расстояние 0.3 м, общая длина профиля 14 м, зондирования выполнены расстановкой Шлюмберже. Центром расстановки стала крупная фумарола (рис. 11).

Геохимические параметры термальных и поровых растворов

Геохимическое опробование на Донном термальном поле выполнялось несколько лет: в 2006, 2007, 2009 годах, в связи с чем возможно сравнение одних и тех же термальных источников, их расположения, параметров, состава. Геохимические параметры растворов грязевых котлов, их поровых вод удивляют своим разнообразием. Контрастные составы, уровень минерализации, уровни pH и Eh могут наблюдаться у источников, находящихся на расстоянии полуметра друг от друга, они различаются по цвету, прозрачности и температуре (рис. 12).

На диаграмме (рис. 12) параметры растворов котлов, измеренные в 2006 году, резко отличаются от остальных ультра-кислыми условиями (отрицательный уровень pH). Столь высокая кислотность объясняется маловодными годами, поскольку измерения 2009 года показали повышение уровня pH до значений от 1 до 3 – высокое количество осадков, снеготалые и дождевые воды разбавили высокоминерализованные воды термальных источников Донного поля. Ультракислые высокоминерализованные

растворы термальных источников вулканов Эбеко и Мутновский объединены в одну диаграмму именно из-за схожести аномальных параметров.

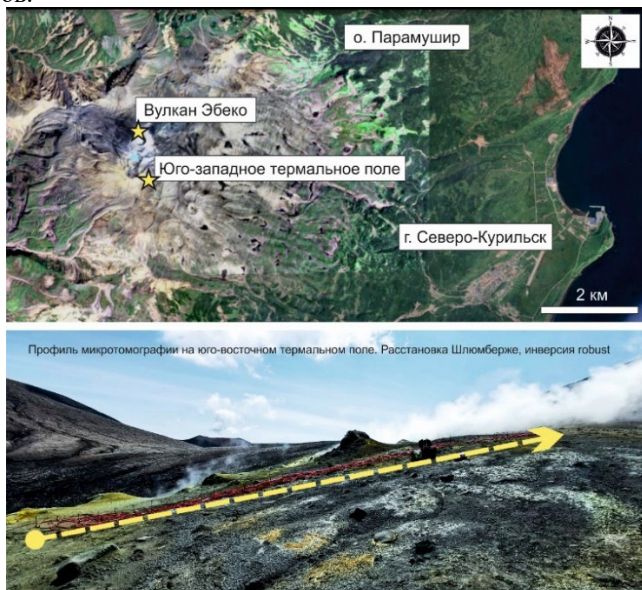


Рисунок 11 - Схема исследований в кратере вулкана Эбеко. Сверху - место исследования на космоснимке сервиса Google Earth от 08.2024 г. в приближении с высоты 14 км. На фотографии автора – расстановка микротопографии, ориентирована с юга на север

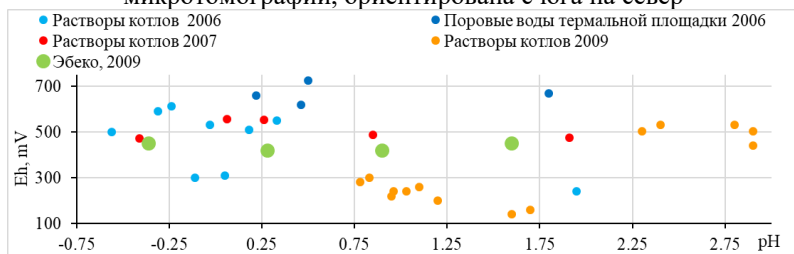


Рисунок 12 - Окислительно-восстановительный потенциал в сопоставлении с уровнем кислотности растворов Донного термального поля вулкана Мутновский и растворов вулкана Эбеко

Результаты геофизических исследований

С исследованиями 2009 года сравнивались последующие измерения ЧЗ и трёхмерной ЭТ. Важно и примечательно, что предположительные контуры подводящего канала Большого котла нашли своё отображение на всех результатах зондирования. На рисунке 13 представлены результаты ЭТ 2013 и 2020 года, трёхмерной визуализации серии профилей ЧЗ 2009 года.

Очертания проводящего участка, начинающегося у поверхности посередине термального поля ($0.1 - 8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), уходят корнями вглубь и прослеживаются вплоть до максимальной глубины исследования – 42 метров. Это свидетельствует об общем источнике тепла и вещества, несмотря на то, что котлы со столь разнообразным составом и контрастными параметрами находятся рядом, имеют общий приповерхностный источник. ЧЗ по серии профилей, объединённых в трёхмерный массив, дало хорошую визуализацию Большого котла, указало на соединение подводящих каналов термальных котлов в единую структуру на глубине порядка 8-10 метров.

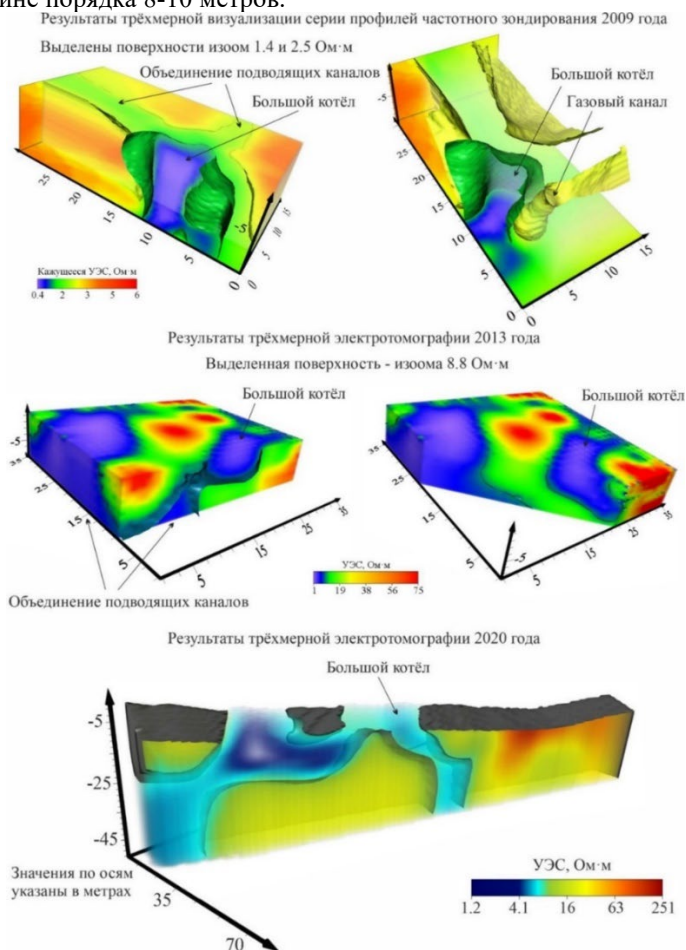


Рисунок 13 - Трёхмерные исследования на Донном термальном поле влк. Мутновский

На рисунке 13 в массиве данных ЧЗ выделена изоповерхность значения УЭС 8.8 Ом·м, которая максимально близко отражает границы подводящих каналов Большого грязевого котла и находит отображение в результатах зондирования методом ЭТ 2009 года. Сопоставление результатов трёхмерной визуализации данных ЧЗ и ЭТ 2009, 2013, 2020 годов демонстрирует корреляцию в положении границ Большого котла, а также проводящего массива под Донным термальным полем. Соответствие границ не идеальное - это связано с ежегодными изменениями структуры термального поля, количеством осадков, локальными происшествиями – обвал стенок кратера, сход снежника.

Профиль микротомографии на вулкане Эбеко (рис. 14) традиционно имеет аномально низкое сопротивление, что обусловлено высокой проводимостью среды – гидротермально изменённых пород, насыщенных жидкостью и газами. Несмотря на это, в середине профиля выделяется наиболее проводящая зона: по всей видимости, она включает канал, питающий крупную фумаролу. Этот метод контроля является наиболее точным и неразрушающим. Учитывая схожесть растворов источников вулкана Эбеко с растворами Донного поля Мутновского вулкана по минерализации и кислотности, можно сделать предположение о наличии общего питающего канала для разных источников на вулкане Эбеко.

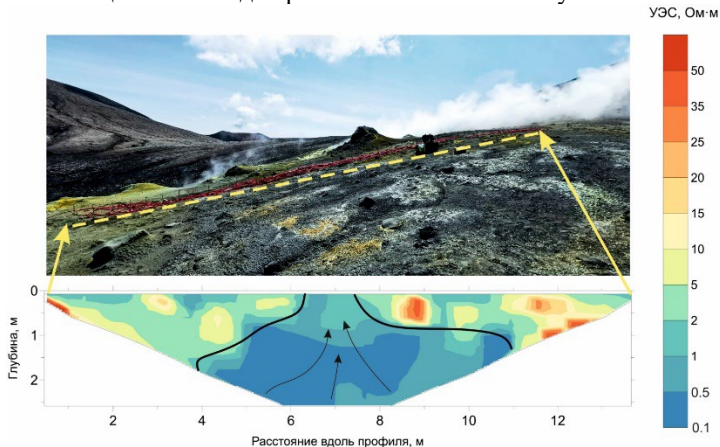


Рисунок 14 – Профиль микротомографии на юго-восточном термальном поле вулкана Эбеко. Центр расстановки - большая фумарола.

Связь геофизических и геохимических параметров среды

Источники с одинаковыми номерами, где в разные годы отбирались пробы, могут иметь разные очертания - это обусловлено тем, что термальное поле – как живой организм, постоянно видоизменяется в зависимости от количества осадков в этот год, путей схода снежника с бортов кратера, режимами разгрузки. Результаты оценки УЭС по

эмпирической зависимости Муанфара для растворов термальных источников Мутновского вулкана вполне сопоставимы с полученными методами ЧЗ и ЭТ. При этом минерализация источников Донного термального поля зачастую более 50 грамм на литр. Различие значений электрического сопротивления, полученного разными методами, объясняется разным масштабом исследований и общей высокой проводимостью среды.

Третье защищаемое положение. По данным частотного электромагнитного зондирования и электротомографии термальные растворы грязевых котлов на Донном фумарольном поле вулкана Мутновский с уникальным химическим составом имеют один питающий канал, прослеженный до глубины более 40 м. Разнообразие составов термальных разгрузок определяется вариациями соотношения флюид/метеорные воды и степенью взаимодействия растворов с вмещающими породами. Согласно построенной геоэлектрической модели, выходы ультракислых высокоминерализованных растворов грязевых котлов имеют чётко прослеживаемые стабильные структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертационной работы является установление путей, структуры и физико-химических параметров разгрузки приповерхностных гидротерм на примере термальных полей Курило-Камчатской островной гряды, обладающих контрастными типами растворов как по физико-химическим параметрам, так и по содержанию широкого круга химических элементов. Большая разница указанных параметров характерна не только для разных вулканов, но обнаруживается в пределах одного термального поля. Эта разница, по мнению автора, объясняется путями миграции флюидов, степенью их взаимодействия с вмещающими породами, соотношением метеорных вод и флюидов глубинного генезиса.

В работе определена геоэлектрическая зональность подповерхностного пространства термальных полей с помощью ЧЗ и ЭТ, установлена качественная и количественная связь геофизических и геохимических параметров среды, проинтерпретированы результаты геофизических и геохимических исследований для определения строения подповерхностного пространства гидротермальных систем.

Результатом диссертационной работы являются полученные с помощью ЧЗ и ЭТ геоэлектрические характеристики верхней (до 45 метров) части разреза, отображающие каналы гейзеров и грязевых котлов. Установлено, что грязевые котлы на термальных площадках кальдеры вулкана Узон разгружаются через серию трубообразных выходов. Построены геоэлектрические модели, описывающие зональность внутренних частей термального поля, которая определяется, главным

образом, соотношением жидкой и твёрдой фазы. Минерализация и уровень концентрации элементов в жидкой фазе зависит от доли флюида, взаимодействующего с вмещающими породами, что и определяет электропроводность системы «вода-порода». По результатам интерпретации данных ЭТ установлено, что гейзеры Академии Наук (гидротермы системы озера Карымского) питаются из единой обводнённой линзы, расположенной на глубине от 5 до 20 метров; питающие каналы гидротерм Медвежьих и горячих выходов на полуострове Новогодний уходят корнями к общему источнику, тяготеющему к кратеру Токарева. По данным ЧЗ и ЭТ термальные растворы грязевых котлов на Донном фумарольном поле вулкана Мутновский с уникальным химическим составом имеют один питающий канал, прослеженный до глубины более 40 м. Разнообразие составов термальных разгрузок определяется вариациями соотношения флюид/метеорные воды и степенью взаимодействия растворов с вмещающими породами. Согласно построенной геоэлектрической модели, выходы ультракислых высокоминерализованных растворов грязевых котлов имеют чётко прослеживаемые стабильные структуры. Учитывая схожесть растворов источников вулкана Эбеко с растворами Донного поля Мутновского вулкана по минерализации и кислотности, можно сделать предположение о наличии общего питающего канала для разных источников на вулкане Эбеко.

Результаты электротомографии, частотного зондирования и пересчёт минерализации проб в электрическое сопротивление использованы при определении путей разгрузки термальных источников. Предложено объяснение контрастности растворов – различные пути миграции флюида в приповерхностном пространстве, переход химических элементов из вмещающих пород в растворы в верхних горизонтах. Следует подчеркнуть оригинальность и надёжность выбранного комплекса методов – ЧЗ дополняет ЭТ деталями; геохимическое опробование, результаты анализов позволяют привязать значения удельного электрического сопротивления к определённому участку гидротермального поля.

Описанный в настоящей работе комплекс для исследования подповерхностного пространства неразрушающими методами может применяться для обнаружения каналов миграции флюидов и исследования гидротермальных месторождений, мониторинга процессов разработки гидротермальных месторождений, обеспечения безопасности туристических троп на любых термальных полях.

Перспективы развития выполненного исследования просматриваются как в прикладных, так и в научно-исследовательских направлениях. Прикладной задачей является доразведка геотермальных ресурсов, например, на территории крупнейшей геотермальной электростанции России – Мутновской. Научно-исследовательской задачей является расширение комплекса методов геофизики для исследования термальных

полей – включение сейсмических и магнитотеллурических методов, увеличение глубинности и детальности при определении структуры подводящих каналов термальных полей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК (К1)

1. **Mishenina S.P.**, Shevko A.Ya., Shevko E.P., Gora M.P. Study of the Bottom Sediments Composition in the Volcanic Thermal-Seawater Mixing Zone // ISSN 1819-7140, Russian Journal of Pacific Geology, 2025, Vol. 19, No. 6, pp. 695-701. DOI 10.1134/S1819714025700459
2. Батанов Ф.И., Абкадыров И.Ф., Дегтерев А.В., Захаров С.М., **Коханова (Мишенина) С.П.**, Новиков Ю.В., Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г., Хомчановский А.Л., Хубаева О.Р. Экспедиция "Итуруп 2022-2023": основные направления работ и предварительные результаты // Геосистемы переходных зон – № 1 (8) – С. 47-55 – 2024.
3. Шевко Е.П., Гора М.П., **Коханова (Мишенина) С.П.**, Панин Г.Л. Формирование состава термальных вод современных активных вулканов на примере кальдеры Головнина (о. Кунашир, Курильские острова) // Тихоокеанская геология – том 42 – № 1 – С. 100-111 – 2023.
4. **Kokhanova (Mishenina) S.**, Kucher D., Volynkin S. Geophysical and geochemical studies on an active volcano (Ebeko volcano, Paramushir Island) // Reliability: Theory and Applications – том 70 – № 4 – С. 357-360 – 2022.
5. Shevko E.P., Bortnikova S.B., Abrosimova N.A., Kamenetsky V.S., **Bortnikova (Mishenina) S.P.**, Panin G.L., Zelenski M. Trace Elements and Minerals in Fumarolic Sulfur: The Case of Ebeko Volcano, Kuriles // Geofluids – том 2018 – 2018.
6. Панин Г.Л., Гора М.П., **Бортникова (Мишенина) С.П.**, Шевко Е.П. Подповерхностная структура Северо-Восточного фумарольного поля вулкана Эбеко (о. Парамушир) по данным геоэлектрических и геохимических исследований (Курильские острова) // Тихоокеанская геология – том 34 – № 4 – С. 67-85 – 2015.

Монография / глава в монографии

7. Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Гора М.П., Шевко А.Я., Панин Г.Л., Ельцов И.Н., Жарков Р.В., Котенко Т.А., **Бортникова С.П.**, Манштейн Ю.А., Котенко Л.В., Козлов Д.Н., Абросимова Н.А., Карин Ю.Г., Поспеева Е.В., Казанский А.Ю. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис // ИНГТ СО РАН – Новосибирск – 282с. – 2013.

Материалы зарубежных конференций

8. Eltsov I., Bortnikova S.B., Panin G., **Bortnikova S.P.** Geoelectrics Of The Volcano Mutnovsky (Kamchatka) // SAGA 13th biennial conference and 6th International AEM 2013 (Skukuza Rest Camp, Kruger National Park Mpumalanga South Africa, 6th to 9th October 2013) – Mpumalanga – p. 98 – 2013.

9. **Bortnikova S.P.**, Bortnikova S.B., Gora M.P., Shevko A.Y., Lesnov F.P., Kiryuhin A.V. Boiling Mud Pots: Origin and Hydrogeochemistry (Donnoe and North-Mutnovsky Fumarolic Fields, Mutnovsky Volcano; South Kamchatka, Russia) // Proceedings World Geothermal Congress 2010 (Bali, Indonesia, 25-29 April 2010) – Bali – p. 1480 – 2010.

Материалы российских конференций

10. **Коханова С.П.**, Волынкин С.С., Цибизова Е.В. Результаты электротомографии на термальных полях вулкана Баранского, о. Итуруп, Южные Курилы // EAGE. Инженерная и рудная геофизика 2023: Сборник материалов конференции и выставки (г. Санкт-Петербург, Россия, 15-19 мая 2023 г.) – ООО "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ" – СПб – С. 339-341 – 2023.
11. Панин Г.Л., Котенко Т.А., **Коханова С.П.** Совместные геофизические и геохимические работы на гидротермальных объектах вулкана Баранского, о. Итуруп // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXVI ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2023 г. – ИВиС ДВО РАН – Петропавловск-Камчатский – С. 156-159 – 2023.
12. Цибизова Е.В., Волынкин С.С., **Коханова С.П.** Газоэманационная съемка термального поля влк. Баранского // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XIX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. (г. Новосибирск, 17-19 мая 2023 г.) – СГУГиТ – Новосибирск – том Т. 2 – № 4 – С. 43-49 – 2023.
13. Шевко Е.П., **Коханова С.П.** Модель перераспределения вещества в подповерхностном пространстве активных вулcano-гидротермальных систем в зависимости от строения флюидопроводников // Современные направления развития геохимии: Материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвященной 65-летию Института геохимии им. АЛ. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона (г. Иркутск, 21-25 ноября 2022 г.) – Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН – Иркутск – С. 235-238 – 2022.
14. **Коханова С.П.**, Пыряев А.Н., Волынкин С.С. Обсуждение источника микроэлементов в термальных растворах активных вулканов Камчатки и Курильских островов на основе геохимических и изотопных данных // Современные направления развития геохимии: Материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвященной 65-летию Института геохимии им. АЛ. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона (г. Иркутск, 21-25

ноября 2022 г.) – Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН – Иркутск – С. 247-249 – 2022.

15. **Грахова С.П.**, Бортникова С.Б., Панин Г.Л. Результаты трехмерной электротомографии кратера Токарева (Карымский вулканический центр, Камчатка // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVI международной научной конференции (г. Новосибирск, 20-24 апреля 2020 г.) – ИНГГ СО РАН – Новосибирск – С. 373-384 – 2020.
16. Шевко Е.П., Гора М.П., Панова К.С., Панин Г.Л., **Грахова С.П.** Формирование состава термальных вод вулкана Головина в зависимости от строения подводящих каналов [Электронный ресурс] // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы третьей Всероссийской научной конференции с международным участием (г. Чита, 20-25 августа 2018 г.) – Изд-во БНЦ СО РАН – Улан-Удэ – С. 239-242 – 2018.
17. **Грахова С.П.**, Ельцов И.Н., Фаге А.Н. Комплексное описание геотермальных полей вулканов Мутновский и Эбеко на основе геохимических и геофизических исследований // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле (г. Новосибирск, 19-23 ноября 2018 г.): Материалы конференции – ИПЦ НГУ – Новосибирск – С. 150-152 – 2018.
18. Шевко Е.П., Бортникова С.Б., **Бортникова С.П.**, Панин Г.Л. Формирование состава термальных вод в зависимости от строения флюидопроводников, на примере вулкана Головинна (южные Курильские острова, Россия) // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (г. Иркутск, 6-9 октября 2015 г.) – Ин-т земной коры СО РАН – Иркутск – С. 196-198 – 2015.
19. Шевко Е.П., **Бортникова С.П.**, Панин Г.Л., Бортникова С.Б. Геохимическая эволюция термальных растворов источников кальдеры Головинна (о-в Кунашир, Южные Курилы) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы II Всероссийск. науч. конф. с международ. участием (г. Владивосток, 6-11 сентября 2015 г.) – Дальнаука – Владивосток – С. 130-133 – 2015.
20. Панин Г.Л., **Бортникова С.П.**, Ельцов И.Н., Жарков Р.В. Сравнительные геофизические исследования газогидротермальной системы озера Кипящее в кальдере вулкана Головинна (о. Кунашир) [Электронный ресурс] // Gelendzhik – 23с. – 2015.
21. **Bortnikova S.P.**, Yeltssov I.N., Faguet A.N., Fadeev D.I. Geoelectric Models of Kamchatka Active Volcanic Regions According to the Near-surface Geoelectric [Электронный ресурс] // Saint Petersburg 2014: Proceedings 6th

Saint Petersburg International Conference and Exhibition 2014 - Geosciences-Investing in the Future (Saint Petersburg, Russia, 7-10 April 2014) – Saint Petersburg – 10c. – 2014.

22. Фадеев Д.И., **Бортникова С.П.**, Фаге А.Н. Исследования активных вулканических областей Камчатки методами электротомографии // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8-18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": Сб. материалов в 4 т. Т. 3 – СГГА – Новосибирск – С. 119-123 – 2014.
23. **Бортникова С.П.**, Ельцов И.Н. Структура подводящих каналов термальных источников вулкана Мутновский по геофизическим, геохимическим и петрофизическим данным // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": Сб. материалов в 3 т. – СГГА – Новосибирск – том Т. 3 – С. 185-190 – 2013.
24. **Бортникова С.П.**, Ельцов И.Н., Панин Г.Л., Нестерова Г.В., Ковбасов К.В. Электропроводность вулканических образований по результатам электротомографии и петрофизическим оценкам // Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе: Науч. конф., посвящ. 65-летию ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск, 26-30 сент. 2011 г.): Тез. докл. – Южно-Сахалинск – С. 9-10 – 2011.
25. Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Гавриленко Г.М., **Бортникова С.П.**, Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Кирюхин А.В., Кузьмина А.А., Котенко Т.А. Металлоносность термальных растворов активных вулканов как отражение их генезиса (Южная Камчатка, Парамушир, Россия) // Вулканизм и геодинамика: Материалы IV Всероссийского симпоз. по вулканологии и палеовулканологии (г. Петропавловск-Камчатский, 22-27 сент. 2009 года) – ИВиС ДВО РАН – Петропавловск-Камчатский – том Т. 2 – С. 704-708 – 2009.